

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

 ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ПРОМЫШЛЕННОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 123995
Телефон 240 60 15. Телекс 114818 ПДЧ. Факс 243 33 37

Наш № 20/12-690

“4” ноября 2004 г.

REC'D 17 DEC 2004

WIPO

РСТ

С П Р А В К А

Федеральный институт промышленной собственности (далее – Институт) настоящим удостоверяет, что приложенные материалы являются точным воспроизведением первоначального описания, формулы, реферата и чертежей (если имеются) заявки № 2003128090 на выдачу патента на изобретение, поданной в Институт в сентябре месяце 22 дня 2003 года (22.09.2003).

Название изобретения:

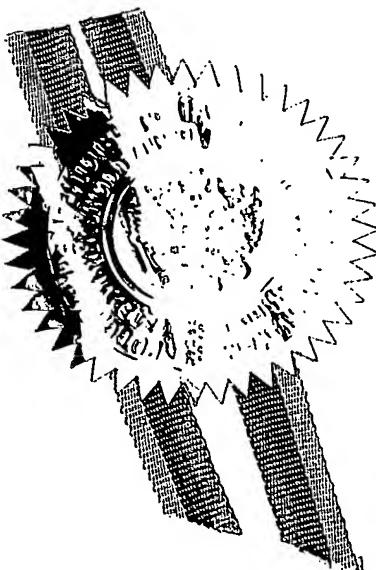
Импульсный плазменный ускоритель и способ
ускорения плазмы

Заявитель:

Государственное научное учреждение
«Государственный научно-исследовательский институт
прикладной механики и электродинамики Московского
авиационного института (государственного техничес-
кого университета)» - ГНУ НИИ ПМЭ МАИ

Действительные авторы:

АНТРОПОВ Николай Николаевич
ДЬЯКОНОВ Григорий Александрович
ОРЛОВ Михаил Михайлович
ПОПОВ Гарри Алексеевич
ТЮТИН Валерий Константинович
ЯКОВЛЕВ Владимир Николаевич



PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Заведующий отделом 20

А.Л.Журавлев

2003128090



МПК 7-ая редакция:
H05H 1/54; F03H 1/00

ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ И СПОСОБ УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Область техники

Изобретение относится к плазменной технике и к плазменным технологиям, а более конкретно – к плазменным ускорителям и способам ускорения плазмы, которые могут использоваться, в первую очередь, для создания реактивной тяги, например, в качестве электроракетного двигателя (ЭРД), устанавливаемого на борту космического летательного аппарата (КЛА), а также для генерации высокоскоростных плазменных потоков при проведении экспериментальных исследований и модельных испытаний. Кроме того, изобретение может применяться для осуществления различного рода технологических операций по обработке изделий и модификации свойств материалов.

Предшествующий уровень техники

Плазменными ускорителями принято называть устройства, посредством которых производится ионизация рабочего вещества и последующее ускорение ионизованного газа (плазмы) под действием электромагнитных сил и сил газового давления в процессе генерации электрического разряда.

Ускорение плазмы в плазменных ускорителях происходит в результате электрического пробоя межэлектродного промежутка. В стационарных плазменных ускорителях длительность электрического разряда достаточно продолжительна – характерное время пробоя t составляет не менее одной секунды. В импульсных плазменных ускорителях (ИПУ) электрический разряд носит более кратковременный характер. Длительность импульсного разряда составляет $t \sim 1 - 100$ мкс.

Импульсные плазменные ускорители в настоящее время применяются как исполнительные органы систем управления КЛА, а также в качестве импульсных инжекторов низкотемпературной плазмы.

Как известно, для поддержания заданного орбитального положения КЛА в процессе торможения в относительно плотной остаточной атмосфере космического пространства целесообразно использование малогабаритных двигательных установок с

низким потреблением электрической энергии. Таким требованиям удовлетворяют двигательные установки на базе ИПУ. В большинстве таких установок в качестве рабочего вещества используется твердый диэлектрик, выделяющий газообразные продукты в результате абляции под воздействием тепловой и лучистой энергии генерируемого электрического разряда.

В настоящее время проявляется тенденция к широкому использованию в космосе сравнительно простых по конструкции и дешевых низкоорбитальных (с высотой орбиты $H_{orb} = 400-1000$ км) маломассогабаритных космических аппаратов (МКА), имеющих характерные массы в диапазоне от 50 до 500 кг. Однако такие МКА обладают существенно ограниченными возможностями энергоснабжения ЭРД, обеспечивающих высокую точность поддержания орбитальных параметров как отдельных МКА, так и группировок МКА. Для этих целей требуются высокоэффективные малогабаритные ЭРД, способные корректировать и стабилизировать орбиты МКА при минимальной потребляемой мощности.

Стационарные плазменные ускорители, используемые в качестве электрореактивных двигателей для управления МКА, обладают рядом серьезных недостатков, к числу которых относятся: сложность конструкции плазменного ускорителя, сложность изготовления и эксплуатации ускорителя, высокий уровень расходов на изготовление и эксплуатацию, а также недостаточная тяговая эффективность (эффективность ускорения плазмы) и невысокая надежность работы при уровне потребляемой мощности менее 150 Вт.

Абляционный импульсный плазменный ускоритель является наиболее перспективным двигателем для МКА с точки зрения простоты конструкции, надежности, дешевизны и способности нормально функционировать при потребляемой мощности от единиц Вт до сотен Вт. Кроме того, ИПУ обеспечивает наивысшую точность управления КЛА по сравнению с иными типами двигательных установок, используемых в качестве исполнительных органов. Однако эффективность известных ИПУ не удовлетворяет действующим требованиям для решения большинства задач по управлению МКА.

Существенное повышение эффективности работы ИПУ, прежде всего в диапазоне потребляемой мощности от 20 до 300 Вт, в котором осуществляется и будет осуществляться в ближайшем будущем решение основных задач по контролю

орбитальных параметров МКА, принципиально важно для расширения диапазона функционирования МКА.

Основными техническими проблемами ИПУ в настоящее время является чрезмерное запаздывание по отношению к разрядному току испарения рабочего вещества и связанное с этим обстоятельством неэффективное ускорение значительной части генерируемой плазмы, что в целом отрицательно влияет на эффективность ускорителя (эффективность ускорения плазмы).

Уже в самых первых работах по исследованию процессов ускорения плазмы в ИПУ отмечалось (Арцимович, Л.А. и др. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы. ЖЭТФ, Москва, 1957, т.33, № 1), что эффективность ускорения плазмы зависит от безразмерного параметра q :

$$q = l^2 C^2 U_0^2 / 2mL_0,$$

где l [Гн/м] - погонная индуктивность электродов ускорителя;

C [Φ] – емкость внешней разрядной цепи;

U_0 [В] – начальное напряжение внешней разрядной цепи;

m [кг] – масса плазменного сгустка;

L_0 [Гн] – начальная индуктивность внешней разрядной цепи.

Физический смысл параметра q заключается в определении отношения характерной величины сил магнитного давления к характерной величине силы инерции ускоряемого сгустка плазмы. Как было установлено, увеличение параметра q приводит к тому, что разряд приближается к апериодической форме, при этом эффективность ускорения плазмы растет.

Одной из известных особенностей ИПУ является то, что масса m ускоряемой плазмы обычно пропорциональна вложенной в разряд энергии W_0 :

$$m \approx kW_0,$$

$$\text{где } W_0 = CU_0^2 / 2;$$

$$k = 10^{-8} \div 10^{-9} \text{ кг/Дж} - \text{коэффициент пропорциональности};$$

При подстановке зависимости для W_0 в предыдущее соотношение зависимость для параметра q принимает вид:

$$q = l^2 C^2 U_0^2 / 2k (C U_0^2 / 2) L_0 = (l^2/k) (C/L_0),$$

Таким образом, при заданной конфигурации и размерах ускорительного канала ИПУ эффективность ускорения плазмы характеризуется соотношением C/L_0 .

Однако в настоящее время еще не разработаны конкретные технические решения, направленные на повышение эффективности ускорения плазмы с помощью ИПУ, которые были бы связаны с реализацией теоретической предпосылки: $q \sim C/L_0$.

Так, например, известен ИПУ, предназначенный для применения в качестве ЭРД системы управления положением геостационарного спутника глобальной системы связи (A.I. Rudikov, N.N. Atnropov, G.A. Popov. " Pulsed Plasma Thruster of Erosion Type for a Geostationary Artificial Earth Satellite", 44th Congress of the International Astronautical Federation, IAF-93-S.5.487, Graz, Austria: IAF, October 16 – 22, 1993). Импульсы тяги, вырабатываемые такой двигательной установкой, должны компенсировать воздействие внешних факторов на КЛА, находящийся на геостационарной орбите.

Каждый импульсный плазменный ускоритель, входящий в состав известной двигательной установки, содержит электроды (катод и анод), один из которых выполнен в виде медного стержня, а другой в виде пластины, твердое диэлектрическое рабочее вещество, забирающее под действием электрического разряда, систему подачи рабочего вещества в разрядный канал рельсового типа и систему инициирования разряда. Электропитание электродов ускорителя осуществляется через токоподводы от внешнего накопителя энергии емкостью 36 μF при максимальном напряжении ~3 кВ.

Работа такого ускорителя осуществляется при давлении газа в ускорительном канале не более чем 10^{-4} торр. Энергия, выделяемая в каждом импульсе, составляет ~ 160 Дж при амплитуде импульса тока 35 кА. Недостатком данной двигательной установки является низкая тяговая эффективность, составляющая не более 10%, что обусловлено колебательным (осцилирующим) характером изменения тока разряда в течение каждого импульса.

В другом известном импульсном плазменном ускорителе (P.J.Turchi, "Directions for Improving PPT Performance", 25th International Electric Propulsion Conference, IEPC 97-038, USA, Cleveland, Ohaio: IEPC, August 24-28, 1997) генерация импульсных осцилирующих разрядов в разрядном канале осуществлялась при электропитании электродов от сильноточного емкостного накопителя энергии. Энергия накопителя составляла 20 Дж при инициирующем напряжении 2 кВ, а емкость накопителя – 10 μF . Индуктивность внешней электрической цепи выбиралась равной 400 нГн. Однако, несмотря на попытки увеличить длительность разряда и создание квазинепрерывного тока разряда в течение каждого импульса, общая тяговая эффективность двигательной

установки не достигла 10%. Полученный показатель тяговой эффективности не позволяет использовать такой плазменный ускоритель на коммерческих КЛА.

Следует отметить, что в рассматриваемой работе сделан правильный вывод о необходимости согласования импедансов внутренней и внешней цепей ИПУ. Однако для решения данной задачи предлагаются весьма сложные и малоэффективные решения, связанные с включением в электрическую цепь дополнительных элементов. Такие элементы, например, емкости, индуктивности и ключи, позволяют согласовать внешнюю и внутреннюю цепи и получить квазиапериодический разряд в ИПУ, но потери энергии на таких элементах значительно снижают положительный эффект.

Помимо изложенной выше существует иная точка зрения на пути повышения эффективности ИПД. Так, известен импульсный плазменный ускоритель (двигатель), содержащий ускорительный канал, образованный двумя электродами, разделяющий их изолятор, служащий рабочим веществом, систему инициирования разряда и накопитель энергии на базе сильноточных конденсаторов, подключенный к электродам через токоподвод. В качестве рабочего вещества в данном двигателе используется тефлон (Gregory G. Spanjers et al. "Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster", AIAA-96-2723, 32nd JPC, Lake Buena Vista, FL, USA: AIAA/ASME/SAE/ASEE, July 1-3, 1996). При работе двигателя исследовалось влияние энергии электрического разряда на эффективность использования рабочего вещества. Однако, несмотря на то, что было достигнуто увеличение импульса тяги и величины тяги, общая тяговая эффективность плазменного ускорителя при энергии разряда ~ 40 Дж составляла от 7% до 8 %. Достаточно низкий уровень тяговой эффективности был обусловлен колебательным характером изменения разрядного тока в течение каждого импульса.

В рассматриваемой работе сделан вывод, что для повышения эффективности ИПУ необходимо уменьшить продолжительность первого полупериода разрядного тока разряда и увеличить его амплитуду. Данный вывод был сделан на основе достоверных экспериментальных результатов, однако он не учитывает нелинейности процессов во внутренней электрической цепи ИПУ, вносимой плазмой.

С целью повышения тяговых характеристик импульсных плазменных ускорителей (двигателей) были разработаны конструкции ускорителей, рассчитанные на высокий уровень энергии электрического разряда (W.J. Guman and D.J. Palumbo "Pulsed Plasma Propulsion System for North -South Stationkeeping", AIAA-76-999, AIAA International Propulsion Conference, Key Biscayne, Florida, USA: AIAA, November 14-17,

1976). Известный импульсный ускоритель (двигатель) включает в свой состав два электрода, образующие ускорительный канал, диэлектрические шашки, выполненные из тефлона, которые установлены между электродами, торцевой керамический изолятор и емкостной накопитель энергии. Емкость накопителя энергии была рассчитана для генерации электрического разряда в ускорительном канале с энергией ~ 750 Дж.

Разряд, генерируемый в разрядном канале данного плазменного ускорителя, имеет осциллирующий характер. Максимальная общая тяговая эффективность двигателя при напряжении разряда 2,5 кВ составила 25,6 %. Однако при указанном уровне энергии разряда достигнутая тяговая эффективность плазменного двигателя не может быть признана достаточной, поскольку эффективность конкурирующих плазменных (магнитоплазменных) двигателей, например СПД (стационарных плазменных двигателей), при таком уровне энергии составляет до 45%.

Известен импульсный плазменный ускоритель (двигатель), содержащий два плоских медных электрода, между которыми установлены две диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, устройство инициирования разряда и накопитель энергии (N. Antropov et al. "Parameters of Plasmoids Injected by PPT", AIAA 97-2921, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Seattle, WA, USA: AIAA/ASME/SAE/ASEE, July 6-9, 1997). Ускорительный канал плазменного ускорителя образован поверхностями электродов и боковыми поверхностями диэлектрических шашек. Накопитель энергии включает в свой состав пять сильноточных конденсаторов с общей запасаемой энергией 80 – 100 Дж. Рабочее напряжение батареи конденсаторов составляет 2,5 – 2,8 кВ. Индуктивность внешней электрической цепи, подключенной к электродам ускорителя, составляла 20 нГн. Эффективность плазменного ускорителя не превышала 13% при энергии электрического разряда 100 Дж.

Наиболее близкими аналогом патентуемого изобретения является эрозионный (абляционный) плазменный двигатель (ускоритель), описанный в патенте RU 2143586 C1 (МПК-6 F03H 1/00, H05H 1/54, опубликован 27.12.1999). Известный аналог содержит электроды (катод и анод), соединенные через омическую и индуктивную нагрузку с обкладками конденсатора (накопителя энергии), разделяющий электроды торцевой керамический изолятор и диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, которые установлены между электродами. Накопитель энергии подключен к электродам через тонкие медные шины (токоподводы). Стенки

разрядного канала образованы поверхностями электродов и диэлектрических шашек. Электроды в известном плазменном ускорителе выполнены в форме пластин. Устройство инициирования разряда (игнайтер) помещено в углублении, выполненном в торцевом изоляторе.

Диэлектрические шашки в известном плазменном ускорителе выполнены с возможностью перемещения в направлении к срединной линии разрядного канала с помощью специального средства перемещения (пружинного толкателя). Перемещение диэлектрических шашек осуществляется до упора в фиксатор, выполненный в виде уступа на поверхности электрода.

Ускорение плазмы в разрядном канале плазменного ускорителя осуществляется следующим образом. На электроды устройства инициирования разряда подается короткий высоковольтный импульс от блока инициирования разряда. В результате поверхностного пробоя образуется плазменный сгусток, закорачивающий электроды ускорителя в углублении торцевого изолятора, в котором формируется электрический разряд дугового типа. При этом электроды в процессе пробоя находятся под «ожиющим» потенциалом. Рабочее вещество, испаряющееся с поверхности диэлектрических шашек лучистой энергией разряда, ионизируется и ускоряется под действием электромагнитных сил и газодинамического давления.

При работе плазменного ускорителя - аналога формируется устойчивый плазменный шнур на начальном участке ускорительного канала, что препятствует осаждению углеродной пленки в этой части канала и соответственно неравномерности выработки рабочей поверхности диэлектрических шашек. Данное явление способствует повышению стабильности тяговых характеристик ускорителя за счет равномерного испарения рабочего вещества.

Электрический разряд в ускорительном канале плазменного ускорителя имеет колебательный характер, количество полупериодов изменения тока импульсного разряда равно трем. В связи с этим максимальная тяговая эффективность плазменного ускорителя не превышает 14%.

Одной из серьезных проблем известного абляционного ИПУ, прямо влияющих на его эффективность, являются потери рабочего вещества, имеющие место в ускорительном канале в процессе ускорения.

Причина потерь рабочего вещества заключается в пространственно-временном несоответствии двух процессов, происходящих в ускорительном канале ИПУ:

- относительно быстрого процесса ($t_{np} \sim 1,5 - 3$ мкс) формирования и ускорения области разрядного тока (токовой перемычки);
- относительно медленного процесса разогрева рабочих поверхностей шапек рабочего вещества, ионизации рабочего вещества, формирования потока плазмы и его ускорения ($t_{np} \sim 7 - 12$ мкс).

Общая продолжительность колебательного электрического разряда в известном ИПУ - аналоге составляет в зависимости от размеров ускорительного канала и особенностей разрядной цепи 8 - 15 мкс. Однако эффективный электромагнитный процесс ускорения плазмы, как установлено, имеет место только в течение первого разряда накопителя (первого полупериода разрядного тока), продолжительность которого составляет от 1,5 до 3,0 мкс в зависимости от энергии и габаритов ускорителя. В ходе развивающегося далее разрядного процесса происходит только аблация (испарение) рабочего вещества и тепловое (газодинамическое) ускорение плазмы.

Сущность изобретения

Изобретение направлено на увеличение доли рабочего вещества, эффективно ускоряемого электромагнитной силой в ускорительном канале импульсного плазменного ускорителя, за счет синхронизации процессов интенсивной аблации диэлектрических шапек и генерации объемной электромагнитной силы, с помощью которой осуществляется ускорение ионизированного рабочего вещества. При этом задача синхронизации указанных процессов обеспечивается за счет максимально возможного сближения импедансов внешней и внутренней электрической цепи плазменного ускорителя.

Техническими результатами, достигаемыми при использовании изобретения, являются: повышение эффективности использования рабочего вещества, снижение потерь электроэнергии во внешней электрической цепи питания и повышение эффективности ускорения плазмы в разрядном канале ИПУ (тяговой эффективности ИПУ, применяемого в качестве ЭРД). Данные технические результаты взаимосвязаны и в целом определяют эффективность ИПУ и процесса ускорения плазмы.

Указанные выше технические результаты достигаются при использовании импульсного плазменного ускорителя, содержащего два электрода, установленные между электродами диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, разрядный канал с открытой торцевой частью, стенки которого образованы

поверхностями электродов и диэлектрических шашек, накопитель энергии, токоподводы, соединяющие электроды с накопителем энергии, которые совместно с электродами и накопителем образуют внешнюю электрическую цепь, изолятор, установленный между электродами у торцевой части разрядного канала, противоположной открытой торцевой части, и устройство инициирования разряда.

Существенным отличием плазменного ускорителя, согласно настоящему изобретению, является то, что характеристики внешней электрической цепи ускорителя выбраны из условия:

$$2 \leq C/L,$$

где, С – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величина которой выбрана из условия: $L \leq 100$ нГн.

Приведенные условия выбора характеристик внешней электрической цепи (С и L) цепи фактически означают, что электрическая емкость разрядной цепи ИПУ, сосредоточенная в накопителе, увеличивается с обычного для ИПУ уровня $\sim 10 - 30$ мкФ до уровня $\sim 40 - 500$ мкФ в зависимости от уровня разрядной энергии и индуктивности L внешней электрической цепи ИПУ.

Выбор диапазонов значений L и С продиктован следующими соображениями.

С увеличением емкости цепи, сосредоточенной в накопителе, продолжительность первого полупериода электрического разряда растет от $\sim 1,5 - 3$ мкс до $\sim 7 - 10$ мкс, а сам разряд из затухающего синусоидального с типичным числом полупериодов от 4 до 6 трансформируется в квазипериодический, что существенно влияет на физический механизм рабочего процесса в ускорительном канале ИПУ.

При выбранных условиях для ИПУ с относительно малой разрядной энергией $\sim 20 - 60$ Дж может быть получен импульс разрядного тока с двумя полупериодами колебаний, причем энергия второго разряда накопителя не превышает 20% от энергии первого разряда.

Согласно современным представлениям только 20% - 40% испарившегося со стенок диэлектрика вещества покидают ускорительный канал ИПУ со скоростями порядка 20 - 30 км/с. Это та часть вещества, которая ускоряется объемной электромагнитной силой ($\bar{j} \times \bar{B}$), возникающей в результате взаимодействия разрядного тока с собственным магнитным полем. Остальные 60% - 80% рабочего вещества

покидают ускорительный канал ИПУ с субтепловыми и тепловыми скоростями $\sim 0,5 - 5,0$ км/с. Это связано с тем, что испарившееся рабочее вещество не успевает взаимодействовать с разрядным током в течение длительности импульса тока. Поэтому значения среднемассовой скорости плазмы на выходе из ускорительного канала ИПУ при приемлемых значениях единичного импульса тяги обычно не превышают $\sim 8 - 12$ км/с. Это явление характерно для двигателя с "быстрым" полупериодом тока ($\tau \leq 3$ мкс). Увеличение длительности полупериода тока приводит к увеличению массы рабочего вещества, которая эффективно ускоряется электромагнитной силой, и к соответствующему росту тяговой эффективности плазменного ускорителя.

Среднемассовая скорость потока рабочего вещества, покидающего ускорительный канал, при длительности первого полупериода $\tau \approx 7-10$ мкс составляет $15-22$ км/с, что довольно близко к скорости движения вдоль электродов ИПУ токовой перемычки (разрядного тока). Такая скорость в ИПУ рассматриваемого типа согласно оценкам составляет $25 - 30$ км/с и является предельной скоростью истечения плазмы. Очевидно, что в процессе электромагнитного ускорения участвует не 20% - 40% рабочего вещества, как это обычно происходит в случае "быстрого" разряда, а около 70% рабочего вещества, образующегося в ускорительном канале. Данное явление нашло подтверждение в процессе проведенных экспериментальных исследований лабораторных моделей ИПУ.

Немаловажным обстоятельством с точки зрения повышения эффективности ИПУ является значительное (на 30% - 40%) снижение расхода рабочего вещества. Такое снижение расхода имеет место при увеличении длительности разряда. Данное явление может быть объяснено уменьшением амплитудного значения разрядного тока и, следовательно, уменьшением интенсивности излучения энергии из зоны токовой перемычки. Излучение токовой перемычки является основным фактором нагрева и испарения диэлектрического рабочего вещества.

Снижение расхода рабочего вещества может быть объяснено также и изменением динамики разрядного тока в ИПУ. Такое изменение связано с тем, что область сгущения токовых каналов (токовая перемычка) так же, как в известных аналогах ИПУ выходит к срезу электродов. Однако в отличие от известных аналогов разряд не гаснет в данной зоне в процессе перезарядки накопителя (с последующим возвратом к началу разрядного канала), а находится в фиксированном положении в течение 5 - 6 мкс.

Таким образом, зона концентрации тока относительно длительное время находится сравнительно далеко от шашек рабочего вещества, что приводит к их существенно меньшему испарению.

Кроме того, заметную роль в повышении тяговой эффективности ИПУ может сыграть уменьшение потерь энергии в его внешней электрической цепи. Прежде всего, снижение потерь происходит в емкостном накопителе энергии за счет лучшего согласования параметров внешней (накопитель энергии, токоподводы к электродам) и внутренней (токовая перемычка - электроды) электрических цепей ИПУ.

Согласно ранее полученным экспериментальным данным типичный уровень индуктивности внешней цепи ИПУ известных типов конструкции составляет 100 нГн и более, а величина емкости $\sim 10 - 30 \text{ мкФ}$. Таким образом, импеданс внешней цепи, определяемый из выражения $Z_{\text{внеш}} = 2(L/C)^{1/2}$, оказывается равным $\sim 200 \text{ мОм}$ (величиной активного сопротивления цепи можно пренебречь ввиду ее малости по сравнению с реактивным сопротивлением).

Импеданс внутренней цепи, зависящий от погонной индуктивности l разрядного канала и скорости V движения токовой перемычки, определяется согласно зависимости: $Z_{\text{внутр}} = l \cdot V / 2$. Величина импеданса внутренней цепи в среднем примерно на порядок ниже импеданса внешней цепи и составляет $\sim 20 \text{ мОм}$.

Результатом недостаточного согласования импедансов внешней и внутренней электрических цепей является диссиляция значительной части разрядной энергии во внешней электрической цепи, - прежде всего в накопителе энергии, обладающем относительно большим активным сопротивлением, - вследствие развития в ней колебательного процесса. Кривая тока в этом случае имеет форму затухающей синусоиды. Однако, как было экспериментально установлено, токовая перемычка эффективно ускоряет плазму только в течение первого полупериода разрядного тока, когда в разряд поступает значительная энергия и электромагнитная сила ($j \times \vec{B}$) имеет достаточную величину.

В патентуемом ИПУ за счет оптимизации внешней цепи посредством выбора параметров C и L согласно указанному выше условию импеданс внешней цепи составляет $Z_{\text{внеш}} \approx 40 \text{ мОм}$. Данный уровень импеданса существенно ближе к импедансу внутренней цепи, чем в известных аналогах. Таким образом, при использовании изобретения параметры внешней и внутренней электрических цепей наиболее

согласованы без усложнения системы электропитания и без дополнительных потерь электроэнергии.

Эффективность процесса ускорения плазмы в ИПУ, выполненном согласно настоящему изобретению, на основании экспериментальных данных составляла от 12% до 35%. При этом уровень потребляемой энергии изменялся в диапазоне от 20 до 150 Дж.

Указанный уровень эффективности ИПУ в среднем примерно вдвое превышает тяговую эффективность известных ИПУ - аналогов для рассматриваемого диапазона потребляемой энергии. Кроме того, аппроксимационные зависимости показывают, что до значений энергии 500 Дж тяговая эффективность патентуемого ИПУ также превышает тяговую эффективность ИПУ - прототипа примерно в 2 раза.

Далее при увеличении потребляемой энергии превышение эффективности начинает уменьшаться и для уровня энергии 0,9 – 1,0 кДж значения эффективности патентуемого ИПУ и ИПУ - прототипа становятся примерно одинаковыми. Это объясняется неизбежным сближением критических параметров (L и C) их электрических цепей, а также увеличением разрядного напряжения при росте потребляемой энергии.

Исходя из вышеуказанных соображений, целесообразно, чтобы на характеристики внешней электрической цепи ускорителя (C и L) накладывалось дополнительное ограничение: $2 \leq C/L \leq 5$. Данное условие характеризует дополнительное ограничение на уровень энергии, запасаемой в накопителе энергии. При выполнении данного условия наблюдается наиболее существенное превышение эффективности процесса ускорения плазмы в ИПУ по сравнению с ИПУ - прототипом.

Индуктивность внешней электрической цепи патентуемого ИПУ выбирается в диапазоне $L = 20 - 100$ нГн. Приведенное дополнительное условие также направлено на поддержание существенного превышения эффективности процесса ускорения плазмы при использовании патентуемого ИПУ по сравнению с ИПУ - прототипом.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение индуктивности внешней электрической цепи более 100 нГн приводит к постепенному сближению параметров патентуемого ИПУ и ИПУ - прототипа. При этом следует принимать во внимание, что минимальному уровню потребляемой энергии должна соответствовать минимальная индуктивность цепи. Величина индуктивности L

ниже 20 нГн в реальной электрической цепи ИПУ при приемлемых для данного типа устройств условиях практически нереализуема.

С целью упрощения конструкции ИПУ электроды могут быть выполнены в форме пластин.

Длина электродов предпочтительно превышает протяженность диэлектрических шашек в направлении ускорения плазмы с целью дополнительного увеличения эффективности процесса ускорения плазмы.

Диэлектрические шашки могут быть выполнены с возможностью перемещения в направлении к срединной линии разрядного канала, при этом ускоритель снабжается фиксатором положения диэлектрических шашек и средством, обеспечивающим их перемещение. Данный вариант выполнения ускорителя позволяет существенно увеличить ресурс работы ИПУ без замены диэлектрических шашек.

В изоляторе, установленном между электродами, может быть выполнено углубление, обращенное к ускорительному каналу. Такое выполнение конструкции ИПУ позволяет повысить равномерность испарения во времени рабочего вещества с поверхности диэлектрических шашек.

В изоляторе, установленном между электродами, в предпочтительном варианте выполнения ИПУ для исключения осаждения углерода, входящего в состав рабочего вещества (трафона или фторопласта), на поверхности шашек выполняются выступы, обращенные к диэлектрическим шашкам. В этом случае в диэлектрических шашках выполняются углубления, соответствующие по форме выступам изолятора.

Каждая из диэлектрических шашек может быть выполнена, по меньшей мере, с одним продольным выступом, обращенным к электроду. Такое конструктивное выполнение шашек и электродов позволяет снизить непроизводительные потери рабочего вещества.

Желательно, чтобы поверхности диэлектрических шашек, обращенные к разрядному каналу, были выполнены склонными по отношению к срединной линии разрядного канала. В этом случае расстояние b_{min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны торцевого изолятора и расстояние b_{max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны открытого торца разрядного канала должно удовлетворять условию: $b_{max}/b_{min} \geq 1,2$. Данный вариант выполнения конструкции ИПУ позволяет стабилизировать процесс ускорения плазмы во времени.

В другом предпочтительном варианте выполнения ИПУ для повышения эффективности процесса ускорения плазмы части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, могут быть установлены под углом α к срединной линии разрядного канала, при этом величина угла α выбирается из условия: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$.

С целью повышения эффективности ускорения плазмы в канале ИПУ части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, могут быть выполнены плавно сужающимися в направлении ускорения плазмы. При этом максимальная d_{\max} и минимальная d_{\min} ширина электродов выбираются согласно условию: $d_{\max}/d_{\min} \geq 2$.

Целесообразно также, чтобы длина и ширина одного из электродов, служащего анодом, превышала длину и ширину второго электрода, служащего катодом. За счет увеличения длины анода достигается равномерность плотности тока по поверхности электродов ИПУ, в особенности на их концевых частях вблизи среза разрядного канала. В результате этого при минимальных размерах и массе электродов повышается надежность работы ИПУ. Данный эффект достигается за счет исключения режимов работы с повышенной локальной плотностью тока, при которых возможно разрушение анода.

Возможность достижения указанного результата объясняется следующими физическими процессами, которые подтверждаются экспериментальными данными.

В части разрядного канала ИПУ, ограниченной диэлектрическими шашками, концентрация плазмы у анода примерно вдвое превышает концентрацию плазмы у катода. Вследствие этого диэлектрические шашки вырабатываются более интенсивно у анода по сравнению с выработкой диэлектрических шашек вблизи поверхности катода. Разрядное пятно на аноде занимает большую поверхность, чем на катоде. В случае если электроды имеют одинаковые размеры (площадь), в частности ширину, то большая часть разрядного тока концентрируется на продольных кромках анода. В результате этого явления происходит усиленная эрозия кромок анода и последующее их разрушение. Увеличение ширины анода по сравнению с катодом существенно снижает вероятность данного негативного явления за счет повышения равномерности плотности тока по поверхности электродов.

Скорость перемещения разрядного пятна вдоль поверхности анода за срезом диэлектрических шашек на 30% выше скорости перемещения пятна по поверхности

катода вследствие действия эффекта Холла, который проявляется в повороте (наклоне) токовой перемычки относительно поверхности электродов в направлении ускорения плазмы. При увеличении длины анода (по сравнению с катодом)) исключается привязка разрядного пятна к его выходной кромке и, соответственно, снижается вероятность разрушения электрода за счет повышения равномерности плотности разрядного тока по поверхности электродов.

Указанные выше технические результаты достигаются также при осуществлении способа ускорения плазмы, который включает зажигание разряда в разрядном канале плазменного ускорителя с помощью устройства инициирования разряда и импульсную подачу разрядного напряжения от накопителя энергии через внешнюю электрическую цепь на электроды плазменного ускорителя, между которыми установлены диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала. При этом, согласно настоящему изобретению, в разрядном канале ускорителя зажигают и поддерживают квазиапериодические импульсные разряды при величине разрядного напряжения U не менее 1000 В и характеристиках внешней электрической цепи ускорителя, удовлетворяющих условию:

$$2 \leq C/L,$$

где C – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величину которой выбирают из условия: $L \leq 100$ нГн.

При осуществлении патентуемого способа ускорения плазмы за счет выбора параметров внешней цепи (C и L) согласно указанному выше условию импеданс внешней цепи максимально приближен к величине импеданса внутренней цепи. Такое согласование параметров электрических цепей достигается без использования дополнительных устройств и, следовательно, без дополнительных потерь электроэнергии. За счет этого эффективность процесса ускорения плазмы при потребляемой энергии от 20 до 150 Дж примерно вдвое превышает тяговую эффективность известных ИПУ. Процесс ускорения плазмы при осуществлении патентуемого способа происходит устойчиво с высокой эффективностью использования рабочего вещества.

Наиболее предпочтительно осуществление способа, когда квазиапериодические разряды зажигают и поддерживают при характеристиках внешней электрической цепи,

выбранных из дополнительного (ограничивающего) условия: $2 \leq C/L \leq 5$. Данное условие характеризует ограничение уровня энергии разряда, при котором наблюдается существенное превышение эффективности ускорения плазмы и использования рабочего вещества по сравнению с известными способами ускорения плазмы.

Как показывают аппроксимационные зависимости, до значений энергии разряда ~ 500 Дж тяговая эффективность способа ускорения плазмы превышает эффективность известных способов-аналогов от 2 до 2,5 раз. Однако при энергии разряда выше 1000 Дж происходит сближение эффективностей процессов ускорения плазмы по патентуемому способу и согласно известным способам-аналогам.

В результате проведенных исследований было установлено также, что напряжение, при котором проявляется эффект существенного повышения эффективности процесса ускорения плазмы, составляет не более 2000 В. При указанных ограничениях напряжения максимальная энергия разряда составляет ~ 1000 Дж.

С учетом установленных зависимостей целесообразно зажигать и поддерживать квазиапериодические импульсные разряды при величине разрядного напряжения $U=1000 - 2000$ В.

Желательно также, чтобы индуктивность L внешней электрической цепи выбиралась в диапазоне $L=20 - 100$ нГн. Приведенное дополнительное условие также направлено на поддержание существенного превышения эффективности процесса ускорения плазмы при реализации патентуемого способа по сравнению со способом-прототипом. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение индуктивности внешней электрической цепи более 100 нГн приводит к постепенному сближению параметров патентуемого и известного способа.

С целью упрощения устройства, предназначенного для ускорения плазмы, используются электроды в форме пластин.

Длина электродов предпочтительно превышает протяженность диэлектрических шапек в направлении ускорения плазмы. Данное выполнение средства осуществления способа позволяет дополнительно повысить эффективность процесса ускорения плазмы.

В процессе ускорения плазмы диэлектрические шапки целесообразно перемещать в направлении к срединной линии разрядного канала до фиксированного положения

относительно поверхностей электродов. Данное выполнение средства реализации способа позволяет осуществлять непрерывный процесс ускорения плазмы без замены диэлектрических шашек.

Ускорение плазмы целесообразно проводить в разрядном канале, в котором поверхности диэлектрических шашек выполнены скошенными по отношению к срединной линии разрядного канала. При этом расстояние b_{\min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны изолятора и расстояние b_{\max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны открытого торца разрядного канала должно удовлетворять условию:

$$b_{\max}/b_{\min} \geq 1,2.$$

Данное выполнение конструкции устройства позволяет стабилизировать процесс ускорения плазмы во времени. Экспериментально было установлено, что в патентуемом ИПУ при его работе максимальный расход рабочего вещества (диэлектрических шашек) происходит не в их средней части разрядного канала, как в известных аналогах ИПУ, а в области выходного сечения разрядного канала. В результате этого процесса рабочие поверхности шашек постепенно "раскрываются". Это довольно продолжительный процесс, требующий порядка 10^5 разрядов накопителя энергии. В течение данного процесса изменяются характеристики ИПУ (в сторону возрастания). Указанный выше вариант конструктивного выполнения диэлектрических шашек направлен на уменьшение времени приработки канала ИПУ и на стабилизацию характеристик рабочего процесса ускорения плазмы, начиная с первого включения ИПУ.

Ускорение плазмы предпочтительно осуществляется в разрядном канале, в котором части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, установлены под углом α к срединной линии разрядного канала. При этом величина угла α выбирается из условия: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$. При указанных условиях дополнительно повышается эффективность процесса ускорения плазмы.

Целесообразно также осуществлять процесс ускорения плазмы в разрядном канале, в котором части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, выполнены плавно сужающимися в направлении ускорения плазмы. При этом максимальная d_{\max} и минимальная d_{\min} ширина электродов выбираются согласно условию: $d_{\max}/d_{\min} \geq 2$. В этом случае увеличивается погонная

индуктивность разрядного канала, что положительно влияет на согласование параметров внешней и внутренней электрической цепи. Как показали проведенные исследования, эффективность процесса ускорения плазмы дополнительно увеличивается на 10% - 12% при использовании сужающихся электродов по сравнению с прямоугольными электродами.

Ускорение плазмы предпочтительно осуществлять в разрядном канале, ограниченном изолятором, в котором выполнено углубление со стороны разрядного канала. Такое выполнение конструкции ИПУ, используемого в качестве средства осуществления способа ускорения плазмы, позволяет повысить равномерность испарения во времени рабочего вещества с поверхности диэлектрических шашек и, следовательно, дополнительно повысить эффективность процесса ускорения плазмы.

В предпочтительном варианте выполнения ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, в котором длина и ширина одного из электродов, служащего анодом, превышает длину и ширину второго электрода, служащего катодом. Данный вариант реализации изобретения позволяет снизить эрозию кромок анода и, вследствие этого, исключить их разрушение при минимальных размерах и массе электродов.

Краткое описание чертежей

Далее группа изобретений поясняется описанием конкретных примеров реализации и прилагаемыми чертежами, на которых изображено следующее:

на фиг. 1 - представлен вид сбоку на ИПУ, выполненный согласно настоящему изобретению;

на фиг. 2 – изображен ступенчатый разрез ИПУ, представленного на фиг. 1, в плоскостях А-А;

на фиг. 3 – схематично изображен разрез разрядного канала ИПУ в варианте выполнения с диэлектрическими шашками, в которых образованы углубления в области контакта с разделяющим электроды изолятором;

на фиг. 4 – схематично изображен разрез разрядного канала ИПУ, представленного на фиг. 3, в плоскости В-В;

на фиг. 5 – схематично изображен поперечный разрез диэлектрических шашек с продольными выступами, обращенными к электродам ИПУ;

на фиг. 6 – схематично изображен поперечный разрез разрядного канала ИПУ, в котором установлены диэлектрические шашки с продольными выступами в варианте выполнения, показанном на фиг. 5;

на фиг. 7 – представлена графическая зависимость изменения разрядного тока I , измеряемого в кА, в течение длительности T импульса тока, измеряемой в мкс, для ИПУ - прототипа;

на фиг. 8 – представлена графическая зависимость изменения разрядного тока I , измеряемого в кА, в течение длительности T импульса тока, измеряемой в мкс, для ИПУ, выполненного согласно настоящему изобретению;

на фиг. 9 – представлены графические зависимости изменения разрядного тока I , измеряемого в кА, в течение длительности T импульса тока, измеряемой в мкс, для различных соотношений параметров C и L внешней электрической цепи ИПУ, выполненного согласно настоящему изобретению.

Примеры осуществления изобретения

В качестве примера осуществления изобретения ниже приведено описание конструкции импульсного плазменного ускорителя, выполненного согласно настоящему изобретению, и способа ускорения плазмы, реализуемого с помощью импульсного плазменного ускорителя.

Импульсный плазменный ускоритель, изображенный на фиг. 1 – 6, содержит два электрода 1 в форме пластин, одна из которых служит катодом, а вторая – анодом. Между электродами установлены две диэлектрические шашки 2, выполненные из аблирующего материала. В рассматриваемом случае в качестве аблирующего материала используется фторопласт. Длина электродов 1 превышает протяженность диэлектрических шашек 2 в направлении ускорения плазмы.

Стенки разрядного канала ускорителя образованы поверхностями электродов 1 и диэлектрических шашек 2. Одна торцевая часть разрядного канала выполнена открытой, а у противоположной торцевой части канала между электродами 1 установлен торцевой изолятор 3. В качестве материала изолятора 3 используется тугоплавкая керамика, например, Al_2O_3 . В изоляторе 3 выполнено углубление, обращенное к ускорительному каналу.

В состав ускорителя входит также устройство 4 инициирования разряда, представляющее собой два электрода 5, выполненные из медной проволоки. Электроды

5 изолированы друг от друга и от электрода 1 слоем тугоплавкой изолирующей керамики. Устройство 4 встроено в электрод 1, а медные электроды 5 устройства 4 обращены в полость разрядного канала ускорителя.

Части электродов 1, расположенные за диэлектрическими шашками 2 в направлении ускорения плазмы, установлены под углом $\alpha = 15^\circ$ к срединной линии разрядного канала. Величина угла α выбрана согласно условию: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$. При указанном выполнении электродов расстояние между ними в области разрядного канала, где установлены диэлектрические шашки 2, составляет 45 мм, а на срезе разрядного канала – 60 мм.

Кроме того, части электродов 1, расположенные за диэлектрическими шашками 2 в направлении ускорения плазмы, выполнены плавно сужающимися в направлении ускорения плазмы. Максимальная d_{\max} и минимальная d_{\min} ширина электродов выбираются согласно условию: $d_{\max}/d_{\min} \geq 2$. В рассматриваемом варианте выполнения указанное соотношение (d_{\max}/d_{\min}) равно 7.

Размеры одного из электродов 1, служащего анодом превышают размеры второго электрода, служащего катодом (см. на фиг. 1 и 2). В данном варианте выполнения размеры анода (длина и ширина анода) соответственно на 10 мм превышают размеры катода. При указанных условиях обеспечивается равномерность растекания тока (равномерность плотности тока по поверхности электродов) при минимальных размерах и массе ИПУ.

Поверхности диэлектрических шашек 2, обращенные к разрядному каналу, выполнены скошенными по отношению к срединной линии разрядного канала. Расстояние b_{\min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны торцевого изолятора 3 и расстояние b_{\max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек 2 со стороны открытого торца разрядного канала выбраны согласно условию: $b_{\max}/b_{\min} \geq 1,2$. В рассматриваемом варианте выполнения $b_{\max}/b_{\min} = 2$.

Диэлектрические шашки 2 установлены с возможностью перемещения в направлении к срединной линии разрядного канала. В качестве средств, обеспечивающих перемещение диэлектрических шашек 2, используются пружинные толкатели 6. Положение рабочих поверхностей диэлектрических шашек 2 фиксируется с помощью специального фиксатора положения 7, выполненного в виде выступа на поверхности электрода 1, служащего катодом.

Для ориентации положения диэлектрических шашек 2 вдоль направления их перемещения и обеспечения равномерности аблации диэлектрика на боковой поверхности шашек могут быть выполнены углубления 8 (см. фиг. 3 и 4). В этом случае в изоляторе 3, установленном между электродами 1, выполняются соответствующие по форме выступы 9, обращенные к диэлектрическим шашкам 2.

В варианте выполнения конструкции, показанном на фиг. 5 и 6, каждая из диэлектрических шашек 2 выполнена с продольными выступами 10, обращенными к электродам 1. Стрелками на фиг. 6 показано направление перемещения диэлектрических шашек 2 в процессе работы ИПУ.

В рассматриваемом варианте выполнения с одной стороны каждой диэлектрической шашки 2, обращенной к электроду 1, выполнен один продольный выступ 10, а с противоположной стороны - два выступа 10. Данное выполнение обеспечивает, с одной стороны, устойчивое положение диэлектрической шашки 2, а с другой стороны, минимальную контактную поверхность с электродом 1 с целью снижения неэффективного расхода рабочего вещества.

Плазменный ускоритель включает в свой состав емкостный накопитель энергии 11, содержащий четыре конденсатора 12, два из которых изображены на фиг. 1. Накопитель энергии конструктивно соединен с изолятором 3 и, соответственно, с электродами 1 с помощью крепежных элементов 13 в виде разъемного соединения.

Плазменный ускоритель содержит также токоподводы 14 и 15, изготовленные из листовой меди толщиной не менее 0,3 мм. Одна концевая часть токоподводов 14 и 15 подключена к электрическим выводам 16 конденсаторов 12, а другая - к соответствующему электроду - одному из электродов 1 ИПУ. Выводы 16 конденсаторов соединены с токоподводами 14 и 15 с помощью разъемных соединений. Для улучшения электрического контакта резьбовые соединения пропаиваются.

Токоподводы 14 и 15 совместно с электродами 1 и накопителем энергии 11 образуют внешнюю электрическую цепь плазменного ускорителя. С целью снижения индуктивности L внешней электрической цепи токоподводы устанавливаются с минимальным зазором относительно друг друга. Необходимая электрическая прочность в зазоре между токоподводами 14 и 15 обеспечивается посредством размещения в зазоре диэлектрической фторопластовой прокладки (пленки) 17 толщиной 0,5 мм. Данное конструктивное выполнение узла соединения накопителя

энергии 11 с электродами 1 обусловлено требованием обеспечения минимальной величины индуктивности L внешней электрической цепи ($L \leq 100$ нГн).

Электропитание электродов 5 устройства инициирования разряда осуществляется с помощью блока питания 18 устройства 4 инициирования электрического разряда.

Характеристики внешней электрической цепи плазменного ускорителя выбраны из условия, при котором обеспечивается существенное превышение эффективности импульсного плазменного ускорителя по сравнению с устройством-прототипом:

$$2 \leq C/L,$$

где С – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величина которой выбрана из условия: $L \leq 100$ нГн.

При этом следует отметить, что емкость внешней электрической цепи сосредоточена непосредственно в конденсаторах 12 накопителя энергии 11.

Дополнительными условиями выбора параметров внешней электрической цепи, при которых наблюдается максимальная эффективность процесса ускорения плазмы в разрядном канале плазменного ускорителя, являются следующие условия:

$$2 \leq C/L \leq 5 \text{ и } L=20 - 100 \text{ нГн.}$$

Оптимальные значения индуктивности и емкости внешней электрической цепи для рассматриваемого варианта выполнения плазменного ускорителя составляют:

$$L \sim 50 \text{ нГн}; C \sim 150 \text{ мкФ}.$$

Работа импульсного плазменного ускорителя и, соответственно, способ ускорения плазмы осуществляется следующим образом.

При включении ИПУ производится зажигание дугового разряда в разрядном канале ускорителя. В блоке питания 18 инициирующего электрического разряда формируется короткий $\tau \sim 1$ мкс высоковольтный импульс, подаваемый на электроды 5 устройства 4 инициирования разряда. В результате высоковольтного электрического пробоя по поверхности диэлектрика образуется проводящий плазменный сгусток, закорачивающий электроды 1 в процессе его перемещения в разрядном канале.

После зажигания инициирующего разряда происходит электрический пробой основного межэлектродного промежутка между электродами 1, на которые предварительно подается напряжение от конденсаторов 12 накопителя энергии 11 через токоподводы 14 и 15. Электроизоляция токоподводов 14 и 15 осуществляется с помощью фторопластовой прокладки 17, установленной между токоподводами.

Величина разрядного напряжения U выбирается в диапазоне от 1000 В до 2000 В. Подача импульсов напряжения производится через внешнюю электрическую цепь, образованную накопителем энергии 11 и токоподводами 14 и 15.

Отличительной особенностью способа ускорения плазмы является то, что в разрядном канале плазменного ускорителя зажигают и поддерживают квазиапериодические импульсные разряды при величине разрядного напряжения U не менее 1000 В и характеристиках внешней электрической цепи ускорителя, удовлетворяющих условию: $2L \leq C$,

где C – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величину которой выбирают из условия: $L \leq 100$ нГн.

Требуемый уровень индуктивности внешней электрической цепи обеспечивается в реальной конструкции ИПУ за счет подключения электродов 1 непосредственно к токоподводам 14 и 15, имеющим развитые поверхности (большую площадь), при условии минимизации длины токоподводов и расстояния между токоподводами и электродами.

В рассматриваемом примере осуществления изобретения характеристики внешней электрической цепи C и L выбирались наиболее оптимальными, с точки зрения достижения наивысшей эффективности ускорения плазмы, согласно следующим ограничивающим условиям: $2 \leq C/L \leq 5$

при величине индуктивности L внешней электрической цепи, выбранной в диапазоне 20 – 100 нГн.

При соблюдении указанных выше условий наблюдалось наилучшее согласование параметров внешней и внутренней электрической цепи, что и обусловило достижение технического результата, выражющегося, главным образом, в повышении эффективности ускорения плазмы и снижении непроизводительных потерь рабочего вещества и электроэнергии.

Под действием излучения и конвекции из области электрического разряда происходит испарение (абляция) рабочего вещества с рабочей поверхности диэлектрических шапек 2. В разрядном канале плазменного ускорителя происходит частичная ионизация рабочего вещества и последующее ускорение плазменного сгустка электромагнитными и газодинамическими силами. Истекающий из разрядного канала ИПУ плазменный поток создает реактивную тягу.

Выполнение торцевого керамического изолятора 3 с углублением со стороны разрядного канала позволяет оптимально организовать поток плазмы на начальном этапе разряда и избежать осаждения углерода на диэлектрических шашках и в конечном итоге увеличить ресурс плазменного ускорителя.

Максимальное использование электромагнитного эффекта при ускорении в разрядном канале плазменного сгустка, который выполняет функцию токовой перемычки между электродами 1, достигается при использовании электродов, длина которых превышает протяженность диэлектрических шашек 2 в направлении ускорения плазмы. При этом применяются электроды 1, выполненные в форме пластин.

Скорость перемещения разрядного пятна по поверхности одного из электродов 1, служащего анодом, примерно на 30% превышает скорость перемещения пятна по поверхности электрода, служащего катодом. Вместе с тем, концентрация плазмы вблизи диэлектрических шашек у поверхности электрода – анода примерно вдвое выше концентрации плазмы у поверхности электрода-катода. Использование электродов 1, габаритные размеры (ширина и длина) одного из которых, служащего анодом, отличаются от соответствующих размеров электрода, служащего катодом, на 10мм, позволяет существенно повысить равномерность плотности тока по поверхности электродов. Как следствие данного конструктивного выполнения, повышается надежность работы ИПУ при минимальных размерах и массе электродов за счет исключения режимов работы ИПУ с локальной привязкой разрядного пятна.

По мере расходования диэлектрических шашек 2 в процессе аблиации их рабочих поверхностей происходит автоматическая подача шашек посредством их перемещения к серединной линии разрядного канала с помощью пружинных толкателей 6. Фиксация положения диэлектрических шашек относительно электродов 1 производится с помощью фиксаторов положения 7.

В процессе выработки материала шашек 2 они сохраняют склоненную по отношению к срединной линии разрядного канала форму поверхности: расстояние b_{min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны изолятора и расстояние b_{max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны открытого торца разрядного канала удовлетворяет условию: $b_{max}/b_{min} \geq 1,2$.

Указанное конструктивное выполнение диэлектрических шашек 2 позволяет стабилизировать процесс ускорения плазмы во времени за счет предварительного придания разрядному каналу формы, близкой к оптимальной конфигурации.

Выполнение торцевого керамического изолятора 3, который установлен между электродами 1, с выступами 9 (см. фиг. 3 и 4), обращенными к диэлектрическим шашкам 2, а также выполнение углублений 8 в диэлектрических шашках 2, соответствующих по форме выступам 9, позволяет избежать осаждения углерода на поверхности шашек 2 в их начальном сечении. Как, известно, углерод, входящий в состав рабочего вещества-фторопласта, испаряется и осаждается на начальном режиме работы ускорителя на рабочей поверхности шашек 2. Данное явление препятствует установлению оптимального режима расхода рабочего вещества из-за неравномерной абляции поверхности шашек 2.

В случае выполнения диэлектрических шашек с продольными выступами 10 (см. фиг. 5 и 6), обращенными к электродам 1, появляется возможность отделения основной части сравнительно холодной диэлектрической шашки 2 от горячих электродов. В результате этого снижается влияние так называемого эффекта «послепарения» диэлектрических шашек 2. Указанный эффект связан с испарением фторопласта с поверхности перегретой шашки во время паузы между импульсными разрядами. В этом случае существенно снижается эффективность процесса ускорения плазмы, так как значительная часть рабочего вещества в период между импульсами напряжения ускоряется только под действием газодинамического давления.

Как показывают экспериментальные исследования, при создании зазора между шашками 2 и горячими электродами 1 расход рабочего вещества может быть снижен на 15% - 25% в зависимости от подводимой к разряду энергии, а эффективность ускорения плазмы может быть соответственно увеличена.

Использование электродов 1, часть которых со стороны выхода из разрядного канала выполнена плавно сужающейся в направлении ускорения плазмы, позволяет увеличить погонную индуктивность разрядного канала и за счет более лучшего согласования параметров внешней и внутренней электрической цепи повысить эффективность ускорения плазмы на 10% - 12% по сравнению с прямоугольными в плане электродами. Следует отметить, что увеличение индуктивности внутренней электрической цепи более эффективно по сравнению со снижением индуктивности

внешней электрической цепи, выполняемым с целью согласования параметров внутренней и внешней электрических цепей.

Дополнительное увеличение погонной индуктивности разрядного канала и, соответственно, повышение эффективности ускорения плазмы наблюдается при использовании электродов 1, выходные части которых, расположенные за диэлектрическими шашками 2 в направлении ускорения плазмы, установлены под углом α к срединной линии канала. Оптимальное значение угла α выбирается из условия: $10^0 \leq \alpha \leq 40^0$.

Увеличение доли рабочего вещества, ускоряемого электромагнитными силами, при общем снижении расхода рабочего вещества обеспечивается в целом при выполнении существенного условия выбора характеристик внешней электрической цепи:

$$2 \leq C/L,$$

где С – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величину которой выбирают из условия: $L \leq 100$ нГн,

при величине разрядного напряжения U не менее 1000 В.

При указанных выше условиях реализуется зажигание и поддержание квазиапериодических импульсных разрядов в разрядном канале ИПУ в результате сближения импедансов внешней и внутренней электрических цепей. Данный эффект позволяет существенно повысить эффективность ускорения плазмы за счет наиболее рационального использования рабочего вещества и снизить непроизводительные потери электроэнергии во внешней электрической цепи, прежде всего в накопителе энергии. Кроме того, снижение нагрева накопителя энергии за счет уменьшения потерь электроэнергии обеспечивает повышение надежности работы и ресурса ИПУ.

Эффективность ускорения плазмы ИПУ (тяговая эффективность ИПУ-ЭРД) при использовании ИПУ и способа ускорения плазмы, реализующих указанные выше условия, в диапазоне энергии разряда 20 - 150 Дж может быть увеличена до уровня 12% - 35 % по сравнению с уровнем эффективности 6% - 16%, характерным для известных аналогов ИПУ и способов ускорения плазмы.

Достижение технического результата при использовании изобретения подтверждается полученными экспериментальными данными (см. фиг. 7, 8 и 9).

На фиг. 7 и 8 представлены кривые изменения разрядного тока I (кА) в течение длительности импульса тока T (мкс) при величине запасаемой энергии в накопителе $8 W = 100$ Дж, полученные при работе ИПУ - прототипа (фиг. 7) и патентуемого ИПУ (фиг. 8).

Из представленных графических зависимостей следует, что в первом случае (см. фиг. 7) кривая разрядного тока I имеет вид затухающей синусоиды с четырьмя полупериодами, максимальной амплитудой тока близкой к 60 кА и длительностью первого полупериода ~ 3 мкс.

Во втором случае (см. фиг. 8) затухание колебаний разрядного тока I происходит в течение одного полупериода колебаний. Анализ процесса показывает, что после первого разряда накопителя в нем остается не более 15% от уровня запасаемой энергии. Оставшееся в накопителе количество энергии не позволяет осуществить второй пробой разрядного промежутка в течение импульсного разряда накопителя. При этом максимальная амплитуда тока в течение первого полупериода составляет ~ 42 кА, а длительность первого полупериода ~ 10 мкс.

На фиг. 9 представлены полученные в результате проведенных экспериментов осциллограммы разрядного тока I ИПУ, выполненного согласно изобретению. При работе ИПУ был реализован патентуемый способ ускорения плазмы. Величина энергии, запасаемой в накопителе энергии, составляла 20 Дж. Исследования проводились для различных соотношений параметров C и L внешней электрической цепи ИПУ. Для этого использовались три варианта внешней цепи ИПУ: электрическая цепь содержала два, три и четыре конденсатора. Указанным вариантам внешней электрической цепи соответствуют кривые «2С», «3С» и «4С», изображенные на фиг. 9.

Соответственно величине емкости накопителя энергии для каждого из вариантов внешней электрической цепи изменялось соотношение параметров C и L . Отношение C/L для кривой «2С» равно единице, для кривой «3С» – 2,6, а для кривой «4С» – 3,7. Величина эффективности ускорения плазмы (тяговой эффективности ИПУ-ЭРД) для трех вариантов внешней электрической цепи ИПУ соответственно составляла: 6,0 % - кривая «2С», 9 % - «3С» и 11% - «4С».

В результате проведенных исследований было установлено, что существенное увеличение эффективности ускорения плазмы начинает проявляться при выполнении общего условия выбора характеристик внешней электрической цепи ИПУ:

$$2 \leq C/L,$$

где С – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,
 L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величина которой выбрана из
 условия: $L \leq 100$ нГн.

Кроме того, были проведены исследования характеристик ИПУ при различных значениях энергии, запасаемой в накопителе. При величине запасаемой энергии $W=20$ Дж максимальная эффективность ускорения плазмы составляла 11%, при $W=60$ Дж – 20%, при $W=100$ Дж – 27% и при $W=150$ Дж – 33%. Изменение характеристик ИПУ при больших значениях энергии W оценивалось путем аппроксимации экспериментально полученных зависимостей в области высоких значений запасенной в накопителе энергии.

Полученные данные свидетельствуют, что эффективность процесса ускорения плазмы, осуществляемого с помощью патентуемого ИПУ и реализуемого в соответствии с патентуемым способом, в среднем в два раза превышает тяговую эффективность известных аналогов при равных значениях запасаемой в накопителе энергии.

В представленной ниже таблице приведены результаты сравнительных испытаний ИПУ «прототипа и патентуемого ИПУ, с помощью которого реализуется патентуемый способ ускорения плазмы. Номинальная энергоемкость накопителей энергии (конденсаторных батарей) сравниваемых ИПУ устанавливалась на равном уровне: $W=100$ Дж.

Таблица

Основные характеристики ИПУ	ИПУ – прототип	Патентуемый ИПУ
Единичный импульс тяги, Н·с	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Расход рабочего вещества, кг/импульс	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Удельный импульс, с	$1,25 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^3$
Максимальная эффективность ускорения плазмы (тяговая эффективность ИПУ-ЭРД), %	14	26

Из представленных экспериментальных данных следует, что основные характеристики ИПУ – прототипа, хотя и выше чем у большинства известных аналогов, однако они существенно ниже соответствующих характеристик патентуемого ИПУ.

Патентуемые ИПУ и способ ускорения плазмы за счет вовлечения по сравнению с известными аналогами большей части рабочего вещества в процесс электромагнитного ускорения и, вследствие этого, за счет снижения непроизводительного расхода рабочего вещества, а также за счет уменьшения потерь электроэнергии во внешней электрической цепи обладают более высокой эффективностью ускорения плазмы. Достигение данного технического результата позволяет существенно расширить сферу применения ИПУ, повысить надежность его функционирования в условиях жестких ограничений устройства по массе и габаритам и снизить стоимость его эксплуатации.

ИПУ и способ ускорения плазмы, осуществляемый с помощью ИПУ, могут найти применение в различных областях техники. В первую очередь плазменный ускоритель и способ его работы могут быть использованы в электрореактивных двигательных установках КЛА. Вместе с тем плазменный ускоритель может использоваться для осуществления различного рода экспериментов в космическом пространстве, для которых необходимо создание высокоскоростных плазменных потоков.

Кроме того, изобретение может найти широкое применение в технологических процессах: для обработки поверхности изделий, напыления покрытий и получения новых композиционных материалов. Другим важным направлением использования изобретения является проведение наземных экспериментальных исследований и испытаний новых образцов техники посредством имитации воздействия высокоскоростных плазменных потоков на исследуемые объекты.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Импульсный плазменный ускоритель, содержащий два электрода, установленные между электродами диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, разрядный канал с открытой торцевой частью, стенки которого образованы поверхностями электродов и диэлектрических шашек, накопитель которого образованы поверхностями электродов и диэлектрических шашек, накопитель энергии, токоподводы, соединяющие электроды с накопителем энергии, которые совместно с электродами и накопителем образуют внешнюю электрическую цепь, изолятор, установленный между электродами у торцевой части разрядного канала, противоположной открытой торцевой части, и устройство инициирования разряда, отличающийся тем, что характеристики внешней электрической цепи ускорителя выбраны из условия:

$$2 \leq C/L,$$

где С – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величина которой удовлетворяет условию: $L \leq 100$ нГн.

2. Ускоритель по п.1, отличающийся тем, что характеристики внешней электрической цепи ускорителя выбраны из условия: $2 \leq C/L \leq 5$.

3. Ускоритель по п.1, отличающейся тем, что индуктивность внешней электрической цепи выбирается в диапазоне $L=20 - 100$ нГн

4. Ускоритель по п. 1, отличающейся тем, что электроды выполнены в форме пластин.

5. Ускоритель по п. 1, отличающейся тем, что длина электродов превышает протяженность диэлектрических шашек в направлении ускорения плазмы.

6. Ускоритель по п. 1, отличающейся тем, что диэлектрические шашки выполнены с возможностью перемещения в направлении к срединной линии разрядного канала, при этом ускоритель снабжен фиксатором положения диэлектрических шашек и средством, обеспечивающим их перемещение.

7. Ускоритель по п.1, отличающейся тем, что в изоляторе, установленном между электродами, выполнено углубление, обращенное к ускорительному каналу.

8. Ускоритель по п.1, отличающейся тем, что в изоляторе, установленном между электродами, выполнены выступы, обращенные к диэлектрическим шашкам, а в

диэлектрических шашках выполнены углубления, соответствующие по форме выступам изолятора.

9. Ускоритель по п.1, отличающийся тем, что каждая из диэлектрических шашек выполнена, по меньшей мере, с одним продольным выступом, обращенным к электроду.

10. Ускоритель по п. 1, отличающийся тем, что поверхности диэлектрических шашек, обращенные к разрядному каналу, выполнены скошенными по отношению к срединной линии разрядного канала так, что расстояние b_{min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны изолятора и расстояние b_{max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны открытого торца разрядного канала удовлетворяют условию: $b_{max}/b_{min} \geq 1,2$.

11. Ускоритель по п. 1, отличающийся тем, что части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, установлены под углом α к срединной линии разрядного канала, при этом величина угла α выбирается из условия: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$.

12. Ускоритель по п. 1, отличающийся тем, что части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, выполнены плавно сужающимися в направлении ускорения плазмы, при этом максимальная d_{max} и минимальная d_{min} ширина электродов выбираются согласно условию: $d_{max}/d_{min} \geq 2$.

13. Ускоритель по п. 1, отличающийся тем, что длина и ширина одного из электродов, служащего анодом, превышает длину и ширину второго электрода, служащего катодом.

14. Способ ускорения плазмы, включающий зажигание разряда в разрядном канале плазменного ускорителя с помощью устройства инициирования разряда и импульсную подачу разрядного напряжения от накопителя энергии через внешнюю электрическую цепь на электроды плазменного ускорителя, между которыми установлены диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, отличающейся тем, что в разрядном канале ускорителя зажигают и поддерживают квазиапериодические импульсные разряды при величине разрядного напряжения U не менее 1000 В и характеристиках внешней электрической цепи ускорителя, удовлетворяющих условию:

$$2L \leq C,$$

где C – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ,

L – индуктивность внешней электрической цепи в нГн, величину которой удовлетворяет из условию: $L \leq 100$ нГн.

15. Способ по п. 14, отличающийся тем, что квазиапериодические разряды зажигают и поддерживают при характеристиках внешней электрической цепи, выбранных из условия: $2 \leq C/L \leq 5$.

16. Способ по п.14, отличающийся тем, что квазиапериодические импульсные разряды зажигают и поддерживают при величине разрядного напряжения $U=1000 - 2000$ В.

17. Способ по п. 14, отличающийся тем, что индуктивность L внешней электрической цепи выбирают в диапазоне $L=20 - 100$ нГн.

18. Способ по п. 14, отличающийся тем, что для ускорения плазмы используют электроды в форме пластин.

19. Способ по:п. 14, отличающейся тем, что для ускорения плазмы используют электроды, длина которых превышает протяженность диэлектрических шашек в направлении ускорения плазмы.

20. Способ по:п. 14, отличающейся тем, что в процессе ускорения плазмы перемещают диэлектрические шашки в направлении к срединной линии разрядного канала до фиксированного положения относительно поверхности электродов.

21. Способ по:п. 14, отличающейся тем, что ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, в котором поверхности диэлектрических шашек выполнены скошенными по отношению к срединной линии разрядного канала так, что расстояние b_{min} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны изолятора и расстояние b_{max} между противолежащими поверхностями диэлектрических шашек со стороны открытого торца разрядного канала удовлетворяют условию: $b_{max}/b_{min} \geq 1,2$.

22. Способ по п. 14, отличающейся тем, что ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, в котором части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, установлены под углом α к срединной линии разрядного канала, при этом величину угла α выбирают из условия: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$.

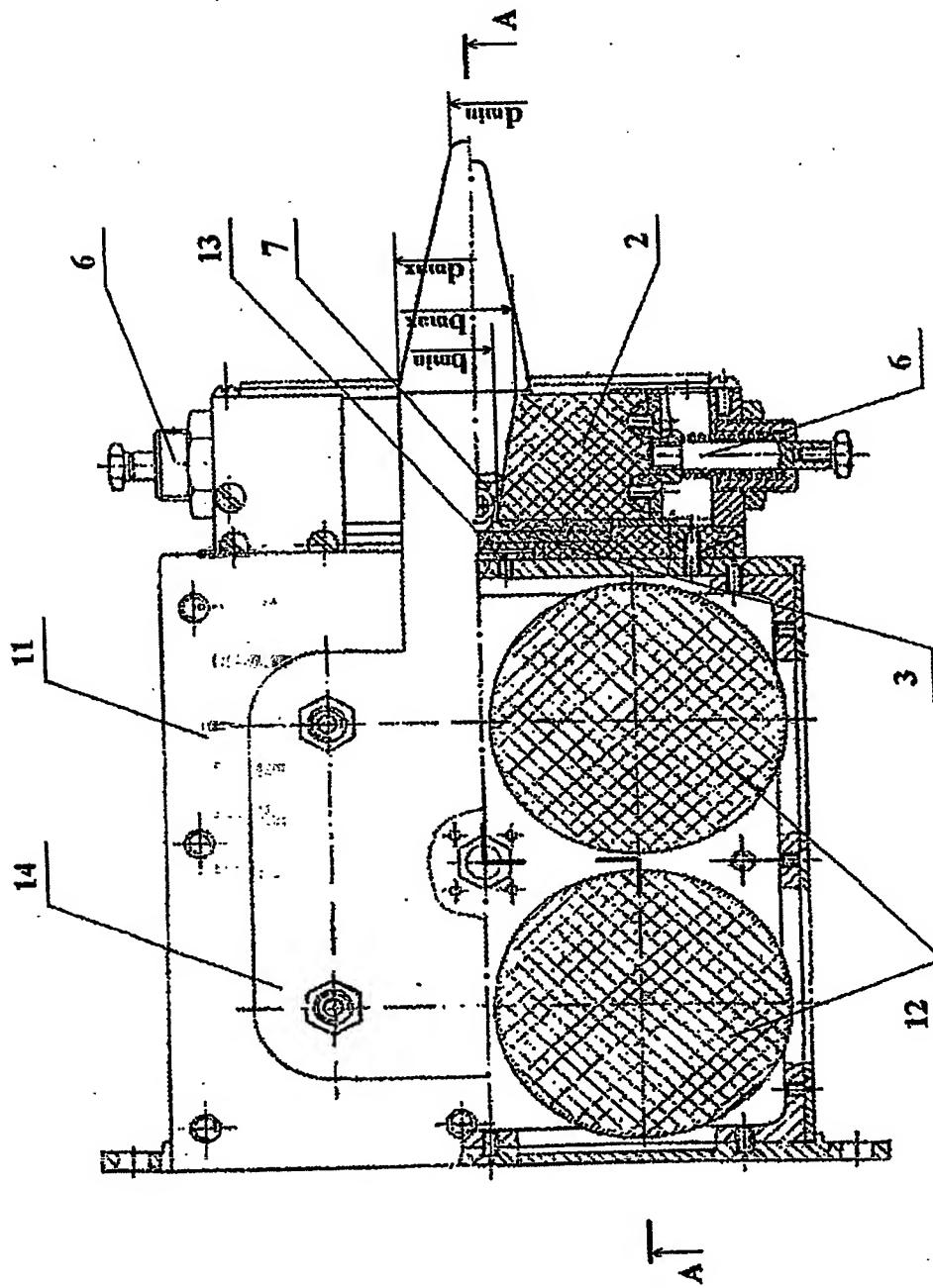
23. Способ по п. 14, отличающейся тем, что ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, в котором части электродов, расположенные за диэлектрическими шашками в направлении ускорения плазмы, выполнены плавно сужающимися в

направлении ускорения плазмы, при этом максимальную d_{\max} и минимальную d_{\min} ширину электродов выбирают согласно условию: $d_{\max}/d_{\min} \geq 2$.

24. Способ по п. 14, отличающийся тем, что ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, ограниченном изолятором, в котором выполнено углубление со стороны разрядного канала.

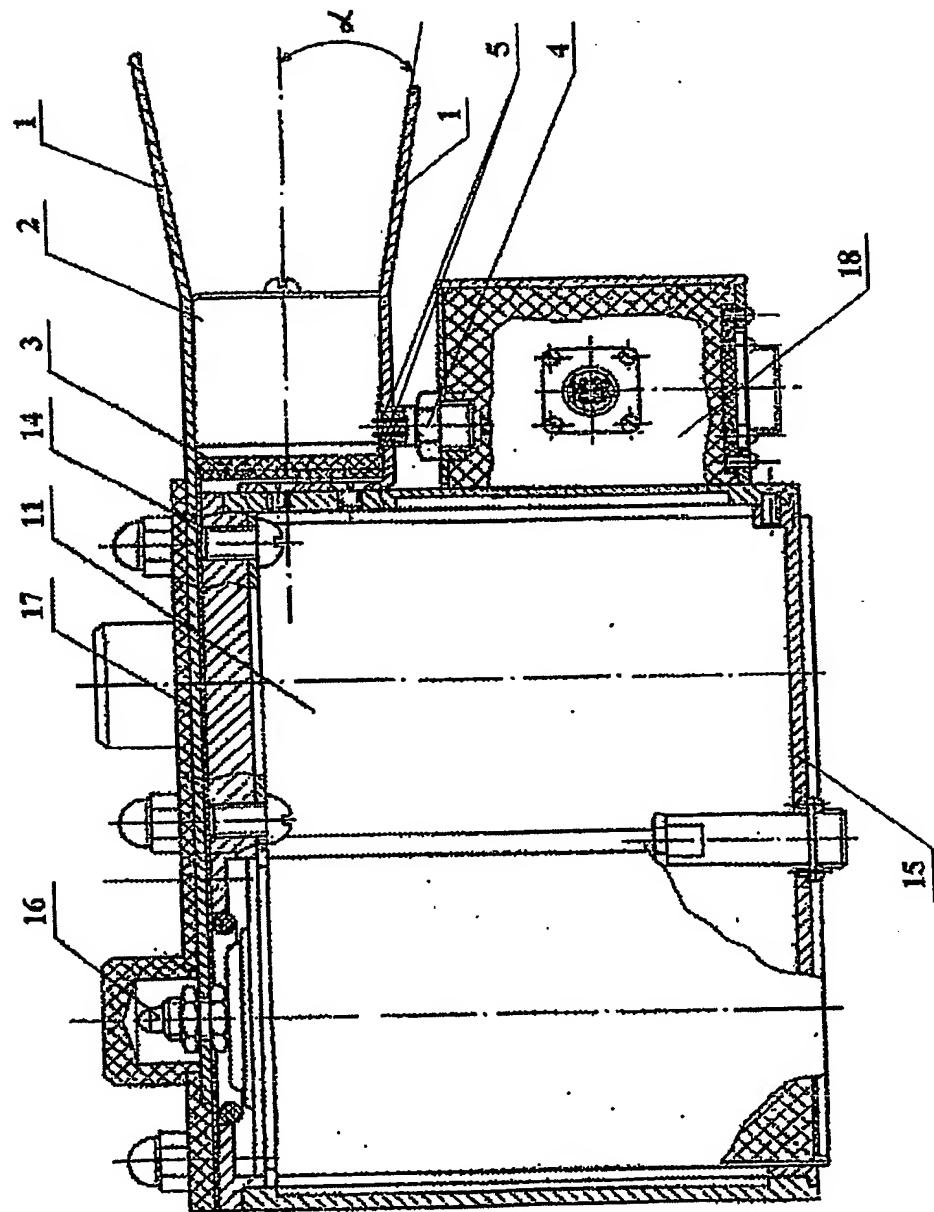
25. Способ по п. 14, отличающийся тем, что ускорение плазмы осуществляют в разрядном канале, в котором длина и ширина одного из электродов, служащего анодом, превышает длину и ширину второго электрода, служащего катодом.

Импульсный плазменный ускоритель и
способ ускорения плазмы



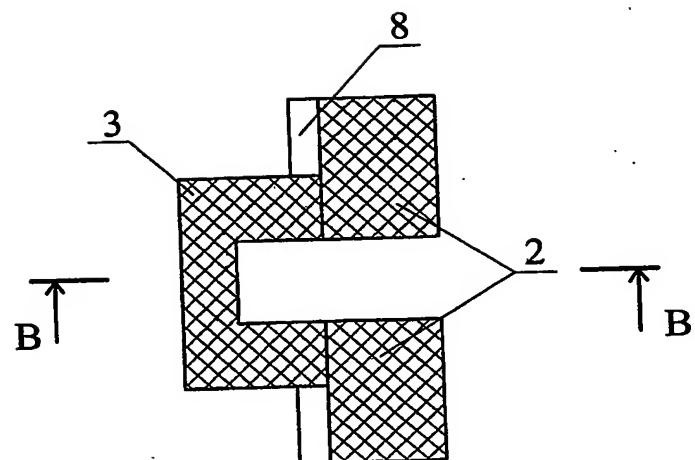
Фиг. 1

Импульсный плазменный ускоритель и
способ ускорения плазмы

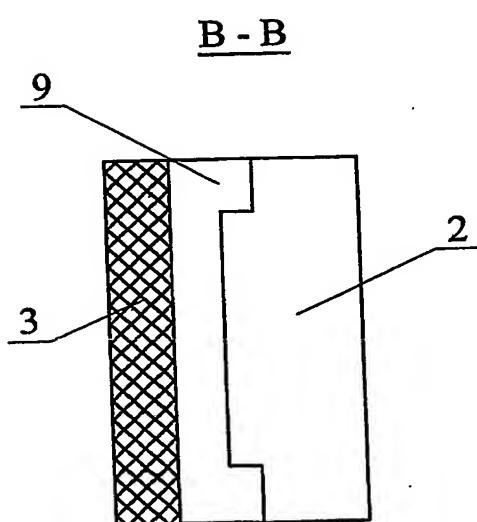


Фиг. 2

Импульсный плазменный ускоритель и
способ ускорения плазмы

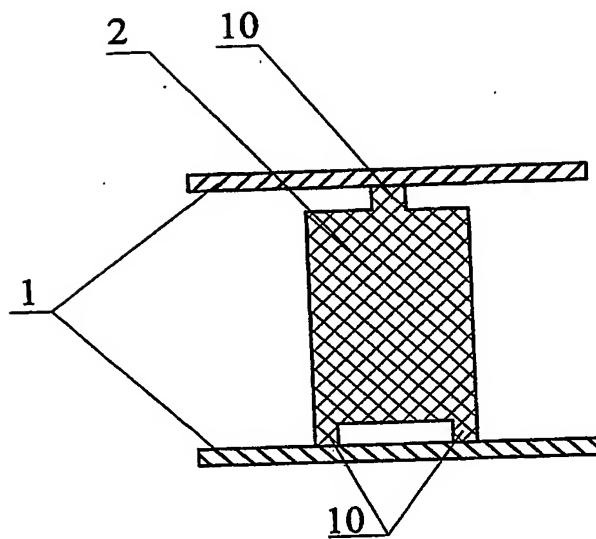


Фиг. 3

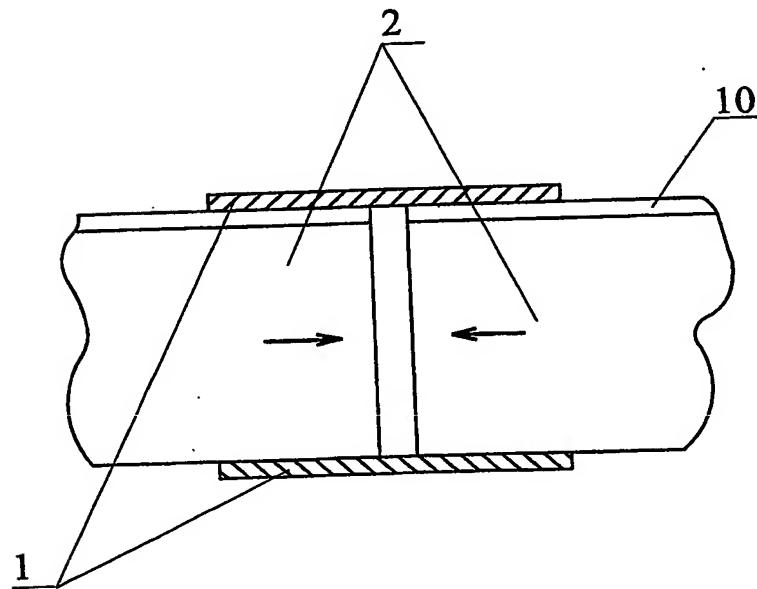


Фиг. 4

Импульсный плазменный ускоритель и
способ ускорения плазмы



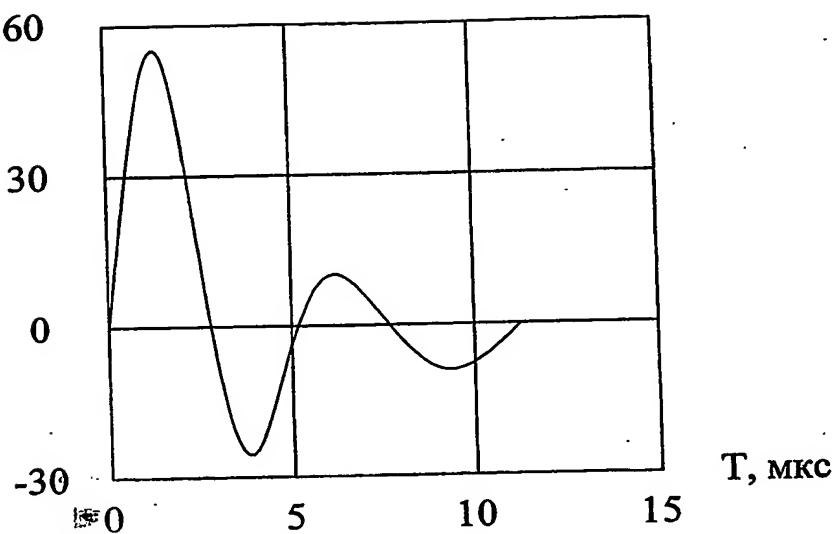
Фиг. 5



Фиг. 6

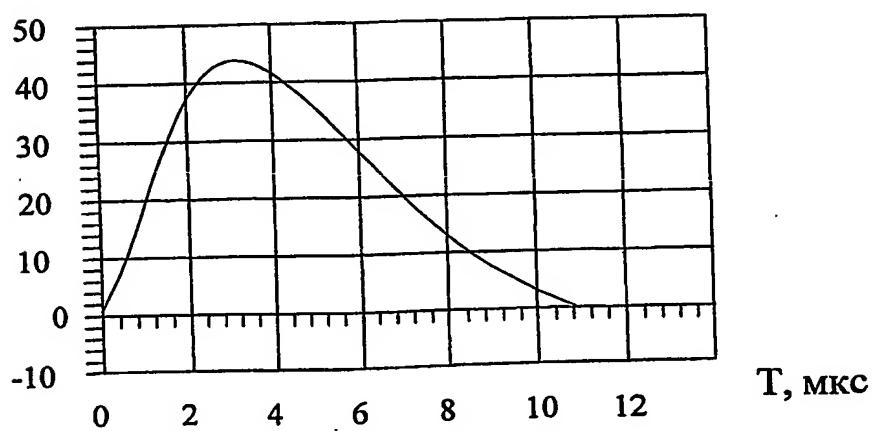
Импульсный плазменный ускоритель и
способ ускорения плазмы

I, кА



Фиг.7

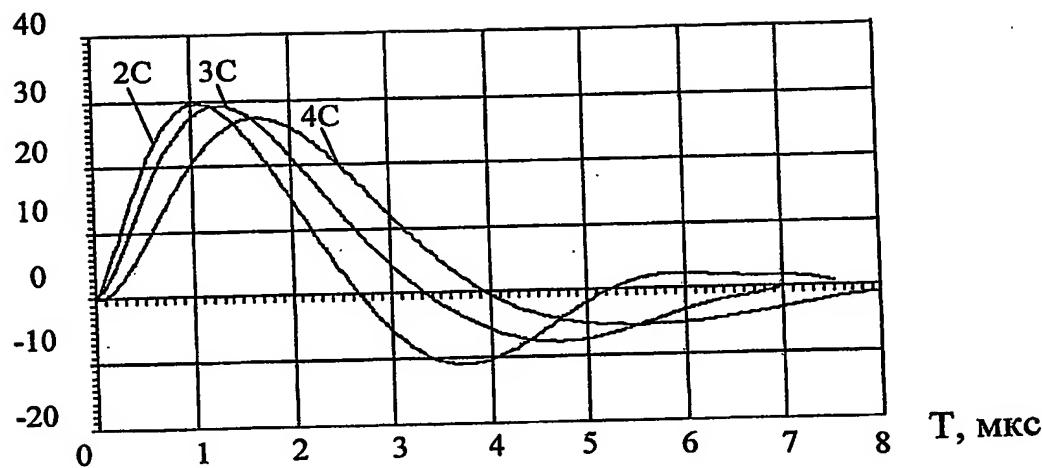
I, кА



Фиг.8

Импульсный плазменный ускоритель
и способ ускорения плазмы

I, кА



Фиг. 9

РЕФЕРАТ

ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ И СПОСОБ УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Изобретение относится к плазменной технике и к плазменным технологиям, а более конкретно – к плазменным ускорителям и способам ускорения плазмы.

Импульсный плазменный ускоритель содержит два электрода, установленные между электродами диэлектрические шашки, выполненные из аблирующего материала, разрядный канал с открытой торцевой частью, стенки которого образованы поверхностями электродов и диэлектрических шашек, накопитель энергии, токоподводы, соединяющие электроды с накопителем энергии, которые совместно с электродами и накопителем образуют внешнюю электрическую цепь, изолятор, установленный между электродами у торцевой части разрядного канала, противоположной открытой торцевой части, и устройство инициирования разряда. Характеристики внешней электрической цепи ускорителя выбираются из условия: $2 \leq C/L$, где C – электрическая емкость внешней электрической цепи в мкФ, а L – индуктивность внешней электрической цепи в мГн, величина которой удовлетворяет условию: $L \leq 100 \text{ мГн}$.

Способ ускорения плазмы заключается в зажигании разряда в разрядном канале плазменного ускорителя и импульсную подачу разрядного напряжения от накопителя энергии на электроды плазменного ускорителя. При этом в разрядном канале ускорителя зажигают и поддерживают квазиапериодические импульсные разряды при величине разрядного напряжения U не менее 1000В и указанных выше характеристиках внешней электрической цепи ускорителя.

За счет наиболее эффективного согласования параметров внешней и внутренней электрической цепи плазменного ускорителя при выбранных условиях достигается повышение, в среднем в два раза, эффективности ускорения плазмы.